

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ
ПРОКАТКИ**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в машиностроении методом поперечно-клиновой прокатки (ПКП) изготавливается широкая номенклатура изделий типа тел вращения с удлиненной осью. Их конфигурация может быть самой разнообразной: цилиндрические, конические и сфероидальные поверхности со всевозможными канавками и выступами. Методом ПКП могут обрабатываться практически все конструкционные стали, ряд инструментальных сталей, а также сплавы на основе меди, титана, никеля, циркония. В процессе эксплуатации прокатанные изделия отличаются более высокой прочностью и износостойкостью. За один проход инструмента диаметральные размеры могут быть уменьшены в 4–8 раз. При этом обеспечивается изготовление деталей или полуфабрикатов диаметром от 2 мм до 120 мм длиной от 40 мм до 1000 мм, максимально достигаемая точность 0,01 мм (на диаметре 7 мм), максимально достигаемая шероховатость поверхности — $Ra=0,6$ мм.

В металлообрабатывающей промышленности технологии, базирующиеся на использовании метода ПКП, используются для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического формообразования, а также под чистовую механическую обработку. Кроме того, существует достаточно обширная группа изделий, например, валы и оси в сельхозмашиностроении, для которых данный метод позволяет получить готовую деталь.

ПКП относится к объемным задачам обработки металлов давлением, трудно поддающимся теоретическому описанию вследствие того, что очаг деформации постоянно вращается вокруг оси заготовки и при этом перемещается вдоль её оси. Деформации и напряжения при прокатке характеризуются значительной неоднородностью, и их экстремальные сочетания могут сопровождаться существенной деградацией пластических свойств металла. Это приводит к вязкому разрушению в осевой области прокатываемого изделия, известному в технике как эффект Маннесмана.

Для упрощения задачи исследования напряженно-деформированного состояния и лучшего понимания процессов, происходящих в очаге деформации, объект исследования можно свести к плоско-деформированному со-

стоянию. Это состояние абсолютно точно реализуется при поперечной прокатке (ПП) бесконечного цилиндра, или приближенно при прокатке по всей длине цилиндра с отношением длины к диаметру более двух.

Рассмотрим особенности поля линий скольжения при ПП (рис. 1). Жесткая область KNL' вращается с угловой скоростью ω вокруг центра O_1 , область LPK' — вокруг центра O_2 . Проекция расстояния O_1O_2 на контакт равна параметру S . Направления линий скольжения α и β определены решением [1].

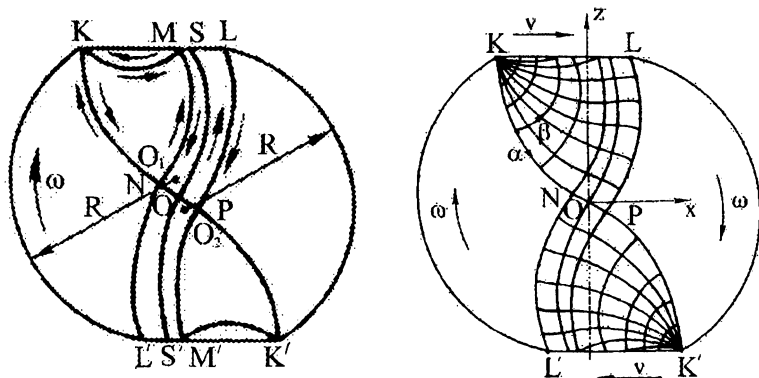


Рис.1. Поле линий скольжения при ПП при степени обжатия 1,10

Вдоль α -линии скольжения KNK' реализуется разрыв скорости v_1 , вдоль β -линий скольжения MNL' и LPM' — разрывы скорости v_2 . Из условия симметрии разрывы скорости по линиям MNL' и LPM' равны. В точках M и M' разрывы скорости отражаются от контакта и согласно теории пластичности (условие непрерывности нормальной компоненты) вдоль α -линий KM и $K'M'$ должны возникнуть разрывы скорости v_3 :

$$v_3 = -\operatorname{ctg}\varphi v_2. \quad (1)$$

Линия скольжения $КОК'$ в точке O меняет знак кривизны. В итоге в соответствии с первой теоремой Генки все линии скольжения, пересекая β -линию SOS' , должны менять знак кривизны.

Положение центров вращения жестких частей O_1O_2 могут быть определены методом верхнеграницной оценки [2], при использовании положения второй теоремы аналитических методов решения задач пластического течения о том, что среди всех кинематических допустимых полей скоростей действительным полем будет то, для которого мощность поверхностных сил на заданных скоростях принимает минимальное значение.

Координаты узловых точек равноугольного поля могут быть определены численно с использованием известных [1] формул. Численное построение поля линий скольжения производится следующим образом. Задаются параметры φ_1 и δ [1]. По известным формулам [1] рассчитываются величины C, R, R_1, φ_0 . Линия скольжения KNO задается в виде уравнения:

$$Az^3 + Bz^2 + Cz + D = x. \quad (2)$$

Из четырех неизвестных A, B, C, D , входящих в уравнение (2), могут быть определены только три, так как известны координаты точек O и K линии KNO. Таким образом, представляется возможность варьирования одним неизвестным с тем, чтобы вдоль линии KNO и PP' наилучшим образом выполнялось условие уравнения Гейрингера

$$du_\alpha - u_\beta d\varphi = 0 \quad \text{вдоль направления а-линии;} \quad (3)$$

$$du_\beta - u_\alpha d\varphi = 0 \quad \text{вдоль направления б-линии.}$$

В точке P' определяется угол наклона линии PP' . Уравнение линии $P'L$ задается в виде

$$A_1 z^3 + B_1 z^2 + C_1 z + D_1 = x. \quad (4)$$

Из четырех неизвестных A_1, B_1, C_1, D_1 можно определить три: координаты точек L, P' и угол наклона линии в точке P' . Четвертый неизвестный параметр уравнения варьируется для выполнения условия уравнения Гейрингера вдоль линии $P'L$.

Окончательное построение поля линий скольжения заканчивается вычислением узлов сетки поля в области $K, P'L$. Абсолютные значения напряжений в узлах сетки линий скольжения находятся с использованием известных уравнений [1].

Скорости деформации могут быть определены по полю скоростей с использованием известных [1] зависимостей:

$$\xi_x = \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad \xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad \eta_x = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}; \quad (5)$$

$$H = \sqrt{\frac{3}{4}(\xi_x^2 + \xi_z^2 - \xi_x \xi_z) + \eta_x^2}.$$

Таким образом, численно построенное поле линий скольжения (рис. 1) позволяет получить исчерпывающую информацию о напряжениях и деформациях в пластической области.

Отметим уникальную ситуацию на оси образца при ПП. При постоянном обжатии напряжения на оси неизменны по величине и направлению (относительно инструмента), а деформации накапливаются пропорционально вращению заготовки, — и все это происходит локально в одной и той же материальной частице металла. Именно в этой области происходит разрушение металла.

Таким образом, исследуя состояние указанной частицы материала, представляется возможным проследить историю деградации пластических свойств материала от исходного состояния до ее разрушения. При этом изменением степени обжатия можно достичь в определенном диапазоне изменения напряжений на оси.

Экспериментально определено, что вскрытие осевой полости при ПП наблюдается для каждого материала при заданных температурно-скоростных условиях и для конкретной степени обжатия после определенного количества циклов нагружения (один цикл нагружения соответствует половине оборота заготовки). Повторяемость результатов экспериментов настолько высока, что нами было предложено использовать это явление как метод определения пластических свойств металлов.

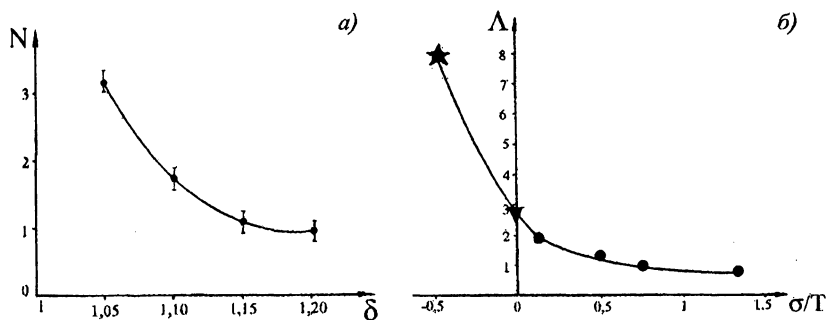


Рис. 2. Экспериментальная зависимость количества циклов нагружения N до вскрытия полости при поперечной прокатке алюминия АД-1 от степени обжатия δ (а) и диаграмма пластичности алюминия АД-1 при комнатной температуре (б)

На рис. 2а показана экспериментальная зависимость количества циклов нагружения N при прокатке в условиях комнатной температуры алюминия

АД-1 от степени обжатия $\delta = D/H$, где D — исходный диаметр, H — расстояние между инструментами. На рис. 26 показаны результаты математической обработки экспериментальных результатов: по оси абсцисс отложены значения накопленных до разрушения деформаций $\Lambda_{пр} = \int H dt$, где $\Lambda_{пр}$ — предельная степень интенсивности сдвига, H — интенсивность скорости деформации сдвига, t — время; по оси ординат отложены значения отношения σ/T , где σ — среднее нормальное напряжение, T — корень квадратный из второго инварианта девиатора тензора напряжений.

Точки «•» зависимости (кривая рис. 26) отражают экспериментальные параметры, при которых наблюдалось вскрытие полости (кривая рис. 2а). Алюминий АД-1 так же подвергался испытанию на кручение и равноканальное угловое прессование [3], т.е. при иных, чем при ПП, значениях σ/T . Результаты показаны на рис. 26 точками «» и «», соответственно.

Все точки хорошо ложатся на кривую рис. 26, отражающую зависимость пластических свойств материала от напряженного состояния, названную в литературе диаграммой пластичности. Отметим, что все три вида испытания: ПП, кручение и равноканальное угловое прессование осуществляются при постоянном параметре $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}$, где $J_3(D_\sigma)$ — третий инвариант девиатора тензора напряжений. Нами показано, что параметр $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}$ так же оказывает влияние на пластические свойства металла, в связи с чем представленная диаграмма пластичности (рис. 26) является частью (точнее ортогональным сечением) объемной поверхности пластичности $\Lambda_{пр} = \Lambda_{пр}(\sigma/T, \sqrt[3]{J_3(D_\sigma)})$.

Экспериментально установлено, что предельная степень интенсивности сдвига $\Lambda_{пр}$ — величина не постоянная и отвечает нормальному закону распределения Гаусса. И как следствие, явление вскрытия осевой полости носит определенный вероятностный характер и может математически прогнозироваться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. — Минск: Наука и техника, 1986. — 223с.
2. Кожевникова Г.В. Метод расчета усилий поперечной прокатки с деформационным упрочнением // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2000. — № 4. — С. 45–50.
3. А.с. 492780 (СССР) Устройство для упрочнения материала давлением / Сегал В.М., Шукин В.Я. — Оpubл.: Б.И. — 1975. — № 3.